



УДК 536.2; 621.1

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ
КОНЦЕПЦИИ ТЕПЛООБМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА
КОНВЕКТИВНОГО
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ
КОМПРИМИРОВАННОГО ВОЗДУХА**

**DEVELOPMENT AND MODELING THE HEAT
EXCHANGE ELEMENT CONCEPTS OF
CONVECTION HIGH TEMPERATURE
COMPRESSED AIR HEATER**

Гильметдинова Юлия Радиковна, магистрант каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: y.gilmetdinova@mail.ru, Тел.: +7(982)622-49-85

Филиппов Прокопий Степанович, аспирант каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: fps_proxi@mail.ru, Тел.: +7(982)712-29-17

Микула Владимир Анатольевич, канд. техн. наук, доцент каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: mikoula@yandex.ru. Тел.: +7(912)664-87-89

Julia R. Gilmutdinova, Master student, Department «Thermal power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: y.gilmetdinova@mail.ru. Ph.: +7(982)622-49-85

Prokopiyy S. Filippov, Postgraduate, Department «Thermal power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: fps_proxi@mail.ru. Ph.: +7(982)712-29-17

Vladimir A. Mikula, Candidate of Engineering Sc., Associate Prof., Department «Thermal power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: mikoula@yandex.ru. Ph.: +7(912)664-87-89

Аннотация: Рассмотрен способ интенсификации теплообмена, при рекуперативном нагреве воздуха до температур порядка 800-1000°C. Проанализировано влияние на процесс теплообмена высоты и толщины продольного ребра, а так же их стоимостные показатели. Выбрана конструкция теплообменного элемента для дальнейшей проработки. Проведено численное моделирование выбранной конструкции в пакете CFD.

Abstract: The method heat transfer enhancement was considered in regenerative air heating to temperatures of about 800-1000 ° C. Impact the fins height and longitudinal thickness on heat transfer were analyzed, as well as their cost parameters were analyzed. The design of the heat exchanger element has been selected for further development. Numerical simulation of the chosen design conducted in CFD.

Ключевые слова: воздух; рекуперативный нагрев; высокотемпературный воздухонагреватель; интенсификация теплообмена; гибридная схема ПГУ; CFD.

Key words: air; recuperative heating; high-temperature air heater; heat exchange intensification; combined-cycle power unit; CFD.

В связи со значительным сокращением запасов природного газа и нефти, с одной стороны, и с достаточно высокой ценой этих энергоресурсов, с другой, интерес к использованию твердых топлив

в энергетике с каждым годом растет все больше. Уже достаточно продолжительное время в мире ведутся исследования по разработке высокоэффективного способа использования угля. Одним из перспективных направлений является развитие ПГУ на твердом топливе, так называемые ПГУ-ВЦГ с внешним сжиганием топлива.

В схеме гибридной ПГУ-ВЦГ с внешним сжиганием топлива на основе процессов термообработки угля и «внешнего» сжигания топлива одним из ключевых элементов является высокотемпературный воздушнонагреватель, в нем нагревается сжатый воздух (до 750-1000°C), направляемый затем в камеру сгорания газовой турбины.

Основная проблема высокотемпературных воздушнонагревателей (ВВН) – это конструкционные материалы труб. Они должны быть достаточно термостойкими, но стоимость подобных металлов высока, например, металл марки ХН67ВМТЮ, рассчитанный на длительную работу при температурах до 950°C, стоит 3 млн. руб./т. Исходя из вышесказанного следует, что при разработке высокотемпературного воздушнонагревателя первоочередной задачей является снижение затрат на дорогостоящий металл. Для решения данной проблемы, авторами предлагается конструкция биметаллической трубы с оребрением (рис. 1). Оребрение обеспечивает интенсификацию теплопередачи и способствует удешевлению конструкции. Внутренняя труба конструкции состоит из жаропрочного сплава ХН67ВМТЮ, а наружная – из углеродистой стали 20 с защитным покрытием, разработанным Уральским институтом металлов. Покрытие позволяет использовать углеродистые стали до ~1050°C.

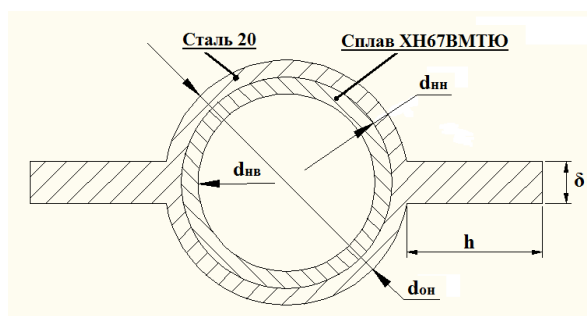


Рис. 1. Конструкция биметаллической трубы с оребрением

Для выбора оптимальной конструкции биметаллической трубы необходимо провести технико-экономический расчет. Геометрические характеристики оребрения подбираются таким образом, чтобы удовлетворить двум основным требованиям: высокой эффективности

теплопередачи и эксплуатационной надежности при минимальных стоимостных показателях.

Стоимость поверхности ВВН определяется, как сумма стоимости жаропрочной трубы ($C_{ж}$), трубы из углеродистой стали (C_{yc}) и стоимости ребер из той же углеродистой стали (C_p).

$$C = \frac{\pi \cdot (d_{нн}^2 - d_{нв}^2)}{4} \cdot \rho_{ж} \cdot l \cdot C_{ж} + \frac{\pi \cdot (d_{он}^2 - d_{нн}^2)}{4} \cdot \rho_{yc} \cdot l \cdot C_{yc} + h \cdot \delta \cdot l \cdot C_{yc}, \quad (1)$$

где $\rho_{ж}, \rho_{yc}$ – плотности жаропрочного и углеродистого металла, кг/м³; $C_{ж}, C_{yc}$ – стоимости жаропрочного и углеродистого металла, тыс. руб./т; l – длина трубы, м; δ – толщина ребра, м; h – высота ребра, м; $d_{нв}, d_{нн}$ и $d_{он}$ – геометрические размеры, м, согласно рис. 1.

Тепловой поток через цилиндрическую оребренную с внешней стороны стенку, рассчитывают по формуле:

$$Q_{op} = k_{op} \cdot (T_{г} - T_{в}) \cdot F_{op}, \quad (2)$$

где Q_{op} – тепловой поток, передаваемый через оребренную стенку, Вт; $T_{г}$ и $T_{в}$ – температуры горячей и холодной среды, °C; k_{op} – коэффициент теплопередачи через оребренную стенку, Вт/(м²·K); F – площадь оребренной поверхности трубы, м².

Для коэффициента теплопередачи через оребренную стенку запишем известную из курса теории тепло- и массообмена [1] формулу:

$$k_{op} = \left(\frac{d_{он}}{\alpha_{в} d_{нв}} + \frac{d_{он}}{2 \cdot \lambda_{ж}} \ln \frac{d_{нн}}{d_{нв}} + \frac{d_{он}}{2 \cdot \lambda_{yc}} \ln \frac{d_{он}}{d_{нн}} + \frac{1}{\alpha_{г} \cdot \eta \cdot \varphi} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где $\alpha_{в}$ и $\alpha_{г}$ – коэффициенты теплоотдачи со стороны воздуха и газов, Вт/м²·K; $\lambda_{ж}, \lambda_{yc}$ – коэффициенты теплопроводности жаропрочного и углеродистого металла, Вт/м·K; η – коэффициент эффективности оребрения; $\varphi = F_{op}/F_{глад}$ – коэффициент оребрения; $d_{нв}, d_{нн}$ и $d_{он}$ – геометрические размеры, м, согласно рис. 1.

Коэффициент теплоотдачи с воздушной стороны определяется следующим образом:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.38}, \quad (4)$$

Используя полученное значение, вычисляем коэффициент теплоотдачи от стенки к цикловому воздуху:

$$\alpha_B = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{он}} \quad (5)$$

Коэффициент теплоотдачи с газовой стороны определяется как:

$$\alpha_r = \alpha_{глад} * (1 - (1 - \eta) * \frac{F_p}{F_{оп}}), \quad (6)$$

где $\alpha_{глад}$ - коэффициент теплоотдачи с газовой стороны для гладкой трубы [2], Вт/м²*К; F_p - поверхность ребра, м².

Для ребра постоянного поперечного сечения, согласно [3], коэффициент эффективности оребрения определяется по формуле:

$$\eta = \frac{th(mh)}{mh} \quad (7)$$

Параметр m рассчитывается как:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_r}{\lambda_{yc} \cdot \delta}}, \quad (8)$$

По вышеизложенной методике производится расчет труб с параметрами:

- внутренний диаметр неоребренной трубы – $d_{нв}$ = 21 мм;
- наружный диаметр неоребренной трубы – $d_{нн}$ = 25 мм;
- наружный диаметр оребренной трубы – $d_{он}$ = 29 мм;
- температура горячей среды - T_r = 1000 °С, холодной - T_b = 300 °С;
- коэффициент теплопроводности жаропрочного металла - $\lambda_{ж}$ = 15,6 Вт/м*К, углеродистой стали - λ_{yc} = 43,3 Вт/м*К;
- стоимость жаропрочного металла $C_{ж}$ = 3000 тыс.руб/т, углеродистого метал - C_{yc} = 50 тыс. руб/т

Толщина ребра – δ = 3, 5 и 10 мм, длина трубы – l = 1000 мм, высота ребра – h , варьируется.

По результатам расчетов построены графики зависимости коэффициента эффективности оребрения от высоты ребра для разных толщин ребра (Рис. 2). По графикам видно, что с увеличением высоты ребра, эффективность оребрения снижается, при этом большим коэффициентом эффективности обладает ребро с большей толщиной (δ = 10 мм).

На рисунке 3 изображен график зависимости стоимости, теплового потока и удельных затрат от высоты ребра для δ = 3 мм. Можно сделать вывод, что с увеличением высоты ребра идет незначительное удорожание трубного элемента,

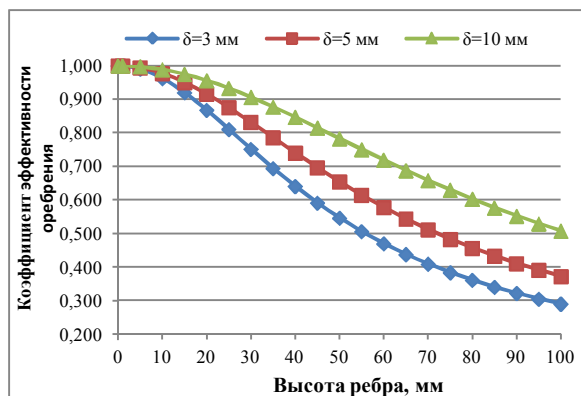


Рис. 2. График зависимости коэффициента эффективности оребрения от высоты ребра

но при этом интенсивность теплообмена значительно возрастает.

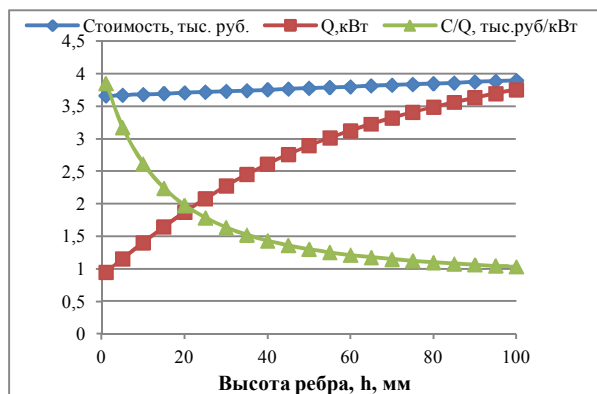


Рис. 3. График зависимости стоимости, теплового потока и удельных затрат от высоты ребра для δ = 3 мм

Для определения оптимальной конструкции оребренной биметаллической трубы строится графики удельных стоимостей (на 1 кВт передаваемой теплоты) для различных толщин ребра (Рис.4).

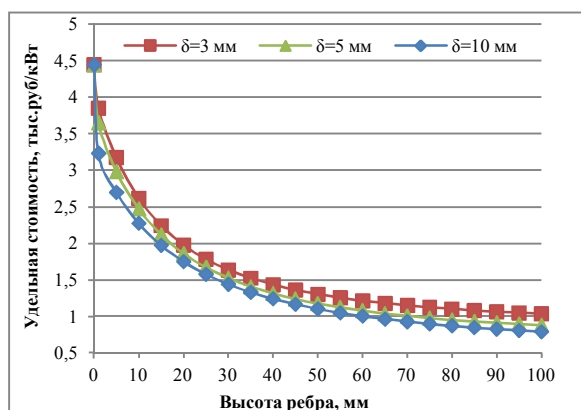


Рис. 4. График зависимости удельной стоимости от высоты ребра

На основании графиков можно сделать вывод, с увеличением толщины ребра от 3 мм до 10 мм,

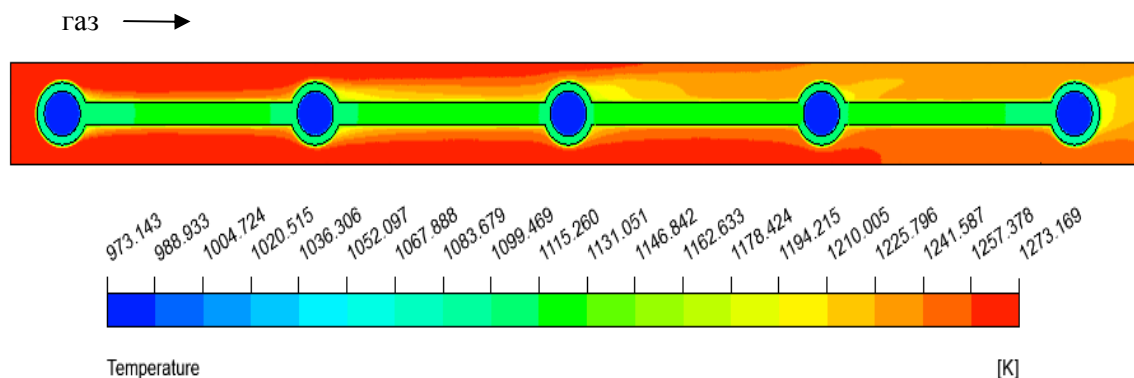


Рис. 5. Температурное поле теплообменного элемента

удельная стоимость снижается нелинейно, поэтому целесообразно выбрать ребро толщиной 10 мм. Что касается высоты ребра, видно, что при высоте до 60 мм удельная стоимость падает достаточно быстро, дальнейшее увеличение ребра дает все меньший положительный эффект. К тому же при увеличении высоты ребра, во-первых, увеличивается сопротивление газового тракта теплообменника, что влечет за собой увеличение затрат на тягодутьевое оборудование, во-вторых, увеличение высоты ребра будет увеличивать габариты секций, а как следствие затрат на корпус теплообменника. Таким образом, увеличение высоты ребра выше 60 мм не имеет смысла.

По результатам расчета теплообменного элемента конвективного высокотемпературного нагревателя компримированного воздуха для дальнейшей проработки выбрана конструкция с высотой ребра 60 мм и толщиной – 10 мм.

Для выбранной конструкции было произведено численное моделирование в пакете CFD. Распределение температурного профиля представлено на рисунке 5.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). СПб.: изд-во НПО ЦКТИ, 1998. 255 с.
3. Д. Керн, А. Краус и др. Развитие поверхности теплообмена. М.: изд-во Энергия, 1977. 78-80 с.
4. Т. Г. Гавра, П. М. Михайлов, В. В. Рис и др. Тепловой и гидравлический расчет теплообменных аппаратов компрессорных установок: Учебное пособие - Ленинградский политехнический институт имени М. И. Калинина, 1982. 33 с.
5. В.Н. Зубарев, А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов и др. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1989.